

0 - 787216

На правах рукописи

РЫЖОВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ДЕЙСТВУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОПРЕН-
ИЗОАМИЛЕНОВОЙ ФРАКЦИИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(химическая технология)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2011

Работа выполнена на кафедре системотехники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный технологический университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Зиятдинов Надир Низамович

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор
Комиссаров Юрий Алексеевич

доктор технических наук, профессор
Лаптев Анатолий Григорьевич

Ведущая организация

ОАО «ГИПРОКАУЧУК» г. Москва

Защита состоится “22” апреля 2011 г. в “14” часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.13 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета (А-303).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные гербовой печатью учреждения, просим отправлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, ГОУ ВПО Казанский государственный технологический университет, секретарю диссертационного совета Д 212.080.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан “13” 03 2011 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д 212.080.13
д.т.н., профессор



А.В. Клинов

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000584772

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Как известно, основные энергозатраты в нефтехимии приходятся на процессы разделения. К числу одних из наиболее энергоемких процессов разделения относятся процессы экстрактивной ректификации, которые нашли широкое применение в производстве изопрена методом двухстадийного дегидрирования изопентана. Среди стадий данного производства по энергоемкости выделяется установка экстрактивного разделения изопрен-изоамиленовой фракции.

За многие десятилетия промышленной эксплуатации установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции претерпевали множество реконструкций, что сделало актуальной задачу поиска энергосберегающих режимов работы данных установок. При этом известно, что существенное влияние на энергозатраты оказывают номера тарелок ввода питания и рецикловых потоков в колонны. Одним из эффективных подходов к решению данной задачи является применение методов системного анализа, опирающихся на современные методы оптимизации технологических процессов. Поиск энергосберегающих режимов работы рассматриваемой установки в данной постановке является задачей дискретно-непрерывной оптимизации. Из-за дискретности номеров тарелок ввода питания решение рассматриваемой задачи, как правило, сводится к простому перебору возможных вариантов ввода питания в колонны и решению для каждого из них задачи оптимизации по непрерывным переменным. Однако, решение задачи для системы ректификационных колонн, включающей множество возможных тарелок ввода питания и подачи рецикловых потоков в колонны, является крайне трудоёмким. Таким образом, системные исследования, связанные с поиском энергосберегающих режимов работы установок разделения изопрен-изоамиленовой фракции, включающие разработку эффективных методов оптимизации систем ректификационных колонн, являются актуальной задачей.

Работа выполнена по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации – «Энергетика и энергосбережение».

Автор выражает благодарность профессору Островскому Г.М. за ценные советы и замечания, высказанные в процессе выполнения работы.

Цели работы.

- Системный анализ и поиск энергосберегающих режимов работы установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции на основе

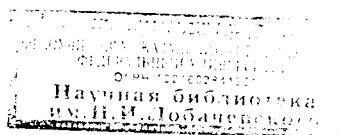
разработанного метода дискретно-непрерывной оптимизации системы ректификационных колонн.

Задачи исследования.

- Построение компьютерной модели установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции;
- системный анализ статических характеристик объекта исследования и выбор на их основе поисковых переменных задачи дискретно-непрерывной оптимизации;
- исследование возможности уменьшения нежелательных примесей в продуктовых потоках установки;
- разработка подхода к определению нижних оценок критерия оптимальности в методе ветвей и границ при выборе оптимальных тарелок питания ректификационных колонн;
- разработка метода выбора оптимальных тарелок подачи питания и ввода рецикловых потоков в системе ректификационных колонн на основе метода ветвей и границ с одновременной оптимизацией режимов работы установок ректификации;
- с применением разработанного метода выбор оптимальных тарелок питания с одновременной оптимизацией режимов работы установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции;
- исследование оптимальных статических характеристик объекта исследования.

Научная новизна работы.

- На компьютерной модели проведены исследования системных связей и законов функционирования установки экстрактивного разделения изопрен-изоамиленовой фракции, позволившие определить параметры технологического процесса, оказывающие наиболее существенное влияние на технико-экономические показатели процесса;
- в результате системного анализа установки выявлена тарелка колонны К-20 с максимальным содержанием н-пентана в изоамиленовой фракции;
- поставлена и формализована задача оптимизации действующей системы ректификационных колонн как задачи оптимального структурно-параметрического синтеза;
- предложен новый подход к определению нижних оценок критерия оптимальности в методе ветвей и границ при выборе оптимальных тарелок питания;
- предложен новый эффективный метод структурно-параметрической оптимизации, основанный на определении номеров оптимальных тарелок питания и тарелок ввода рецикловых потоков, с одновременной



оптимизацией режимов работы установок ректификации позволяющий, найти точное решение и существенно сократить время решения задачи.

Практическая значимость.

- Построена компьютерная модель установки экстрактивного разделения изопрен-изоамиленовой фракции, позволяющая исследовать системные связи и законы функционирования установки в целом;
- разработан алгоритм выбора номеров оптимальных тарелок питания и ввода рецикловых потоков в системе ректификационных колонн, с одновременной оптимизацией режимов работы установок разделения;
- с использованием разработанного метода решена задача дискретно-непрерывной оптимизации промышленной установки экстрактивного разделения изопрен-изоамиленовой фракции, что позволило сократить удельные энергозатраты установки на 8,7 % (5,1 Гкал/ч);
- результаты решения задачи переданы ЗАО «Нефтехимсервис» (Москва) для дальнейшего внедрения на производстве;
- получены оптимальные статические характеристики исследуемой установки, которые могут быть использованы для оптимального управления процессом при изменении составов катализаторов, поступающих на разделение;
- эффективность предложенного метода проверена на примере решения задачи оптимизации узла разделения газов пиролиза производства Этилен-200 ОАО «Казаньоргсинтез». Найденный режим работы установки позволил сократить удельные энергозатраты на 3,1 % (2,3 Гкал/ч);
- положения, разработки и научно-практические рекомендации кандидатской диссертации использованы в учебном процессе СПбГТИ (ТУ) при проведении занятий по дисциплинам: «Системный анализ химической технологии» и «Моделирование систем».

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- использованием в расчетах современных средств математического моделирования и методов оптимизации;
- решением задачи идентификации математических моделей ректификационных колонн установки по данным промышленного эксперимента в различных режимах работы установки;
- выбором наиболее точного метода расчета констант фазового равновесия, путем сравнения расчетных данных, полученных различными методами, с данными эксперимента;

Личный вклад автора:

- построение и идентификация по результатам промышленного

эксперимента компьютерной модели установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции;

- разработка алгоритма решения задачи дискретно-непрерывной оптимизации системы ректификационных колонн;
- апробация разработанного алгоритма на примере оптимизации промышленных установок газоразделения;
- исследование системных связей и законов функционирования, оптимизация установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции;

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-19 (Воронеж, 2006 г.), ММТТ-20 (Ярославль, 2007 г.), ММТТ-21 (Саратов, 2008 г.), ММТТ-22 (Псков, 2009 г.), ММТТ-23 (Саратов, 2010 г.); Международной научной конференции «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» ЛЭРЭП-2 (Саратов, 2007 г.), ЛЭРЭП-3 (Казань, 2008 г.); II Международной научной конференции «Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования» (Воронеж, 2007 г.); III Международной научной конференции «Компьютерное моделирование в химической технологии» (Черкасск, 2008 г.); II Всероссийской студенческой научной конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань 2008 г.); XII Международной научной конференции «Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений» (Казань, 2008 г.); Научных сессиях КГТУ (КХТИ) (Казань, 2007-2011 г.г.); II Международной научной конференции «Компьютерное моделирование в химической технологии и устойчивое развитие» (Киев, 2010 г.).

Данная работа была удостоена: заключения Государственного контракта по программе фонда Бортника «Участник молодежного научно-инновационного конкурса 2008»; премии конкурса 50 лучших инновационных идей для республики Татарстан в номинации «Молодежный инновационный проект»; диплома в номинации «Эффективное использование современных методов научного исследования в работе» в рамках 12-й Международной научной конференции «Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений».

Публикации.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 19 научных работах, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 164 страницах основного текста, состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованной литературы из 166 наименований и приложений на 33 страницах. Работа содержит 120 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, описаны цель, задачи, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, и практическая значимость.

Первая глава посвящена обзору возможностей интенсификации узла разделения изопрен-изоамиленовой фракции. Так же отражены современные методы системного анализа, основанные на математическом моделировании и оптимизации сложных химико-технологических систем и, в частности, систем ректификационных колонн.

Показано, что одной из важных задач при оптимизации режимов работы установок газоразделения является определение номеров оптимальных тарелок питания колонн и ввода рециклов. Показана сложность использования существующих критериев выбора оптимальных тарелок питания в колоннах, при оптимизации систем ректификационных колонн, так как это приводит к задаче оптимизации с разрывной целевой функцией и разрывными ограничениями. В приведенном литературном обзоре дано описание существующих алгоритмов решения задач такого типа.

В главе сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приводятся результаты построения и отладки компьютерной модели установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции. Данная установка включает три колонны ректификации: К-20, К-20а – колонны экстрактивной ректификации с применением в качестве экстрагента безводного диметилформамида (ДМФА), К-35 – колонна десорбции. Каждая колонна имеет 4 возможные тарелки подачи питания. На разделение на установку поступают катализаты 1-й и 2-й стадий дегидрирования изопентана. Продуктовыми потоками узла являются поток изоамиленовой фракции, отбираемой с верха колонны К-20, и поток изопрена-сырца, отбираемого с верха десорбционной колонны К-35.

Системный анализ рассматриваемой технологической установки показал, что данный объект обладает множеством параметров, влияющих на режим его работы. Наличие рецикловых потоков, имеющих высокую параметричность, затрудняет расчет материально теплового баланса схемы. Материальные потоки установки являются многокомпонентными и характеризуются сильной неидеальностью, что требует особого внимания к выбору метода расчета фазового равновесия смеси.

Для выбора наиболее точной модели описания фазового равновесия было проведено сравнение данных по фазовому равновесию основных пар компонентов рассматриваемой системы, полученных экспериментальным и расчетным способами с применением методик Вильсона, NRTL, UNIQUAC, UNIFAC. В результате установлено, что наиболее близкое совпадение экспериментальных и расчетных данных по каждой рассматриваемой паре компонентов обеспечивает метод NRTL. Таким образом, было решено использовать данный метод для расчета фазового равновесия потоков рассматриваемого объекта. Анализ литературных источников показал, что для расчета энтальпии приемлемым будет использование метода Latent Heat (LATE).

Математическая модель многокомпонентной ректификации описывается стандартными уравнениями потарелочного расчета с учетом КПД по Мерффи. Для расчета однократного испарения в модели ректификационных колонн был выбран метод «inside-out».

Математическое описание теплообменников основано на использовании уравнений теплопередачи и средней логарифмической разности температур.

При построении компьютерной модели химико-технологической системы (ХТС) установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции и в дальнейшем для ее расчета использовался последовательный модульный подход.

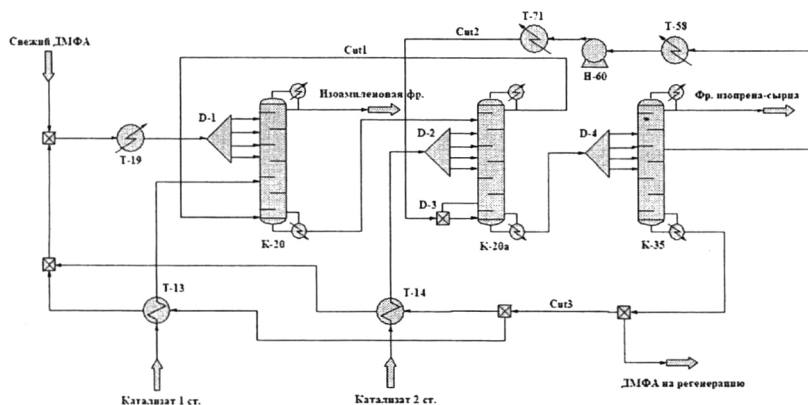


Рисунок 1 – Расчетная схема установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции

Расчетная схема установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции представлена на рисунке 1. На представленной схеме: T-19, T-58 –

теплообменники-холодильники; Т-71 – теплообменник-нагреватель; Т-13, Т-14 – теплообменники-рекуператоры; К-20, К-20а - колонны экстрактивной ректификации, К-35 – колонна десорбции; D-1, D-2, D-3, D-4 – делители потоков; Н-60- насос.

Для обеспечения адекватности математических моделей ректификационных колонн промышленному процессу была проведена идентификация. Задача идентификации заключалась в поиске значений настроечных коэффициентов моделей (эффективных кпд тарелок колонн), минимизирующих сумму квадратов отклонений расчетных и экспериментальных значений параметров установки, при заданных экспериментальных значениях параметров питания, содержании ключевых компонентов в дистилляте и кубовом продуктах. Найденные эффективности тарелок колонн равны: для колонны К-20 – 0,55; для колонны К-20а – 0,53; для колонны К-35 кпд исчерпывающей части – 0,14, укрепляющей – 0,13. Относительные отклонения расчетных от экспериментальных данных по колоннам К-20, К-20а не превышают 4,4%, по колонне К-35 не более 5,4 %.

В третьей главе на компьютерной модели проводилось исследование системных связей и законов функционирования установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции. Исследовалось влияние управляющих параметров на выходные переменные установки: отбор дистиллята колонны К-20 (амиленовая фракция) и концентрацию в ней изопрена, производительность установки по изопрену-сырцу (дистиллят колонны К-35) и содержание в нем изопрена, суммарные удельные энергозатраты.

Показано, что на качество разделения и суммарные удельные энергозатраты установки существенное влияние оказывают: температура и расход ДМФА; расходы флегмы колонн К-20, К-35; расход рецикла из колонны К-35 в К-20а; температура в кубе колонны К-20а.

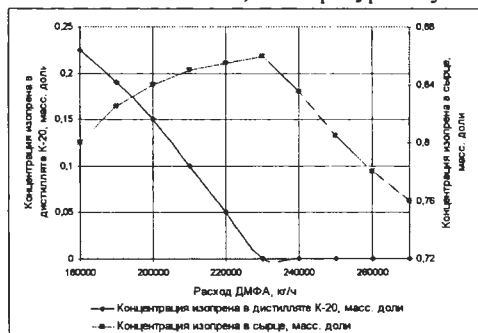


Рисунок 2 – Влияние расхода ДМФА на качество разделения

Так же было установлено, что на выходные переменные оказывают влияние номера тарелок подачи питания в колонны и уровень ввода потока рецикла из колонны К-35 в К-20а. На рисунках 2, 3 представлены некоторые результаты исследования, имеющие экстремальный характер. Экстремальный характер влияния расхода ДМФА на качество разделения (рис. 2)

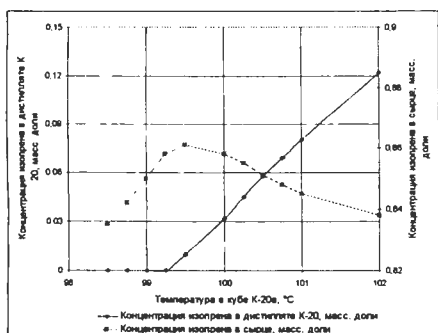


Рисунок 3 – Влияние температуры куба К-20а на качество разделения

ния эффективности работы производств изопрена является минимизация пентанов в изоамиленовой фракции. В ходе исследования концентрационных профилей колонн установки было обнаружено, что в колонне К-20 имеется тарелка с максимальным содержанием н-пентана (рис. 4). Из полученного профиля следует, что на тарелке № 17 достигается максимальная концентрация н-пентана равная 0,12 масс. доли. Таким образом, разница между содержанием н-пентана в дистилляте колонны и на 17-й тарелке составляет порядка 3 %. Сравнение данных хроматографического анализа и результатов численного эксперимента показало их удовлетворительное совпадение. Разница данных расчета и эксперимента не превышает 7%. Важно отметить, что варьирование в достаточно широком интервале управляющих параметров установки практически не изменило места расположения тарелки с максимальной концентрацией н-пентана.

В четвертой главе поставлена и формализована задача оптимизации

действующих разомкнутых и замкнутых (с рециклами) систем ректификационных колонн, которая сформулирована как задача структурно-параметрического синтеза, предложен подход, на основе которого разработаны метод и алгоритм ее решения.

объясняется резким повышением уноса изоамиленовой фракции в поток изопрена-сырца при избытке в системе экстрагента. Точки перегиба в зависимостях качества разделения от температуры в кубе колонны К-20а (рис. 3) показывают на значение данного параметра, при которых достигается максимальная чистота получаемых продуктов.

Важной задачей повыше-

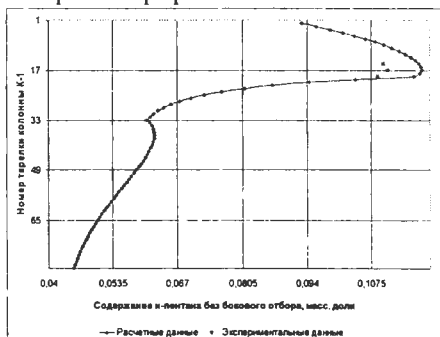


Рисунок 4 – Содержание н-пентана на тарелках колонны К-20

Задача была поставлена следующим образом: найти такие значения поисковых переменных (режимов работы оборудования и оптимальных номеров тарелок ввода питания и подачи рециклов в колонны), при которых выбранный критерий оптимальности примет минимальное значение при выполнении наложенных ограничений.

Формализованная постановка задачи имеет следующий вид:

$$\Phi = \min_{x^j, u^j, m_F^j, m_L^j} \sum_{j=1}^N \Phi^j(x^j, u^j) \quad (1)$$

$$\varphi_i^j(x^j, u^j, m_F^j, m_L^j) = 0, \quad j = 1, \dots, N, \quad i = 1, \dots, n_j, \quad m_F^j \in I_j, \quad m_L^j \in L_j \quad (2)$$

$$\psi^j(x^j, u^j) \leq 0, \quad j = 1, \dots, N, \quad (3)$$

$$F^{jp} - D^p = 0, \quad F^{rp} - W^p = 0, \quad F^{sp} - S^p = 0, \quad Q^{jq} - D^q = 0, \quad Q^{rq} - W^q = 0, \\ Q^{sq} - S^q = 0, \quad (4)$$

$$j_q, r_q, s_q = 1, \dots, N, \quad j_p, r_p, s_p = 1, \dots, N, \quad j, p, q = 1, \dots, N$$

где j – номер ректификационной колонны; x^j, u^j – переменные состояния и управляющие переменные в j -ой ректификационной колонне; m_F^j, m_L^j, n_j – номера тарелок питания, тарелки ввода рецикла и число тарелок в j -ой ректификационной колонне, соответственно; I_j – множество возможных тарелок питания в j -ой ректификационной колонне; L_j – множество тарелок в j -ой ректификационной колонне, на которые подаются рецикловые потоки; $\varphi_i^j(x^j, u^j)$ – математическая модель j -ой колонны в системе; $\Phi^j(x^j, u^j)$ – эксплуатационные затраты на j -ой ректификационной колонне; ограничения типа неравенств (3) – проектные ограничения; уравнения (4) – соотношения, характеризующие структуру системы ректификационных колонн, где F, D, W, S, Q – потоки питания, дистиллятов, кубовых продуктов, боковых отборов, рециклов соответствующих колонн; $j_q, r_q, s_q = 1, \dots, N, j_p, r_p, s_p = 1, \dots, N, j, p, q = 1, \dots, N$ – номера колонн; N – число колонн в рассматриваемой системе. Данная задача является задачей смешанного дискретно-непрерывного нелинейного программирования, в которой управляющие переменные установки являются непрерывными, а тарелки подачи питания и ввода рециклов в колонны дискретными поисковыми переменными.

По условиям задачи, из всего множества возможных тарелок ввода питания и рециклов для каждой колонны может быть выбрана только одна.

Для решения поставленной задачи в работе предлагается новый подход, основанный на совместном использовании методов ветвей и границ (ВГ) и структурных параметров. Основной сложностью применения метода ветвей и границ, является поиск нижней оценки критерия оптимальности. Стандартный подход перехода от дискретных переменных к непрерывным в данном случае не приемлем, так как номера тарелок ввода питания колонн не могут принимать нецелые значения. В работе предложен новый подход к определению нижней оценки критерия оптимальности метода ветвей и границ. Обозначим номер тарелки питания j -ой ($j = 1, \dots, N$)

ректификационной колонны в системе как m^j , где N – число колонн в системе. Для каждой колонны в системе имеется множество I_j возможных номеров тарелок питания. Таким образом, для j -ой колонны выполняется условие $m^j \in I_j$.

Для поиска оптимальных тарелок питания колонн используем структурные параметры и преобразуем задачу к следующему виду.

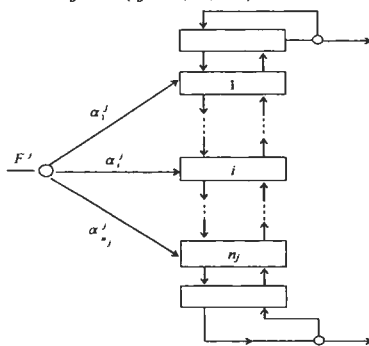


Рисунок 5 – Распределенная подача питания

Поставим делитель потока на входе в каждую колонну (рис. 5). Этот делитель будет подавать часть α_i^j ($i = 1, \dots, n_j$) потока F^j на i -ую тарелку питания j -ой ректификационной колонны где n_j – число возможных тарелок питания j -ой ректификационной колонны. При этом должно выполняться условие:

$$\sum \alpha_i^j = 1 \quad (5)$$

$$\alpha_i^j = 0 \text{ или } 1, \quad i \in I_j \quad (6)$$

$$\alpha_i^j = 0, \quad i \notin I_j \quad (7)$$

Условия (5) – (7) гарантируют, что поток питания в j -ой колонне будет подан только на одну тарелку, номер которой принадлежит множеству I_j .

Для получения нижней оценки критерия оптимальности в методе ВГ заменим условия целочисленности (5) – (7) следующими:

$$\sum \alpha_i^j = 1 \quad (8)$$

$$0 \leq \alpha_i^j \leq 1, \quad i \in I_j^k \quad (9)$$

$$\alpha_i^j = 0, \quad i \notin I_j^k \quad (10)$$

В результате такой замены поставленная задача становится обычной задачей нелинейного программирования.

Поскольку допустимая область непрерывной задачи с условиями (8) – (10) включает в себя допустимую область дискретной задачи с условиями (5) + (7), то решение непрерывной задачи дает нижнюю оценку критерия оптимальности задачи с дискретными переменными.

Разовьем предлагаемый подход для случая, когда в колонну подается больше одного потока питания. Для этого делители потоков необходимо устанавливать на каждом входном потоке в колонну, в результате чего в условиях (5) – (7) α_i^j – доля потока, подаваемого на i -ую тарелку j -ой ректификационной колонны заменяется на $\alpha_{i,l}^j$ – доля потока, подаваемого на i -ую тарелку j -ой ректификационной колонны от l -го делителя. В этом случае, множество возможных номеров тарелок питания j -й колонны I_j будет заменено на $I_{j,l}$ – множество возможных тарелок питания колонны, на которые подается поток от l -го делителя.

В данной постановке, на k -й итерации метода ВГ будет производиться дробление множества $I_{j,l}^k$ потенциальных тарелок питания j -ой ректификационной колонны, на которые подаются потоки от l -го делителя. В ходе ветвления будет осуществляться переход от одного делителя колонны к другому. При выполнении условия, что для каждого делителя j -ой колонны будут определены по одной оптимальной тарелке подачи питания, произойдет переход к ветвлению тарелок делителя следующей колонны в системе.

Алгоритм решения задачи описанным методом представлен на рисунке 6. N – число колонн в системе; k – номер итерации; ε – малая величина; η^0 – большая величина; $I^0 = \{I_j^0, j = \overline{1, N}\}$. M^k – множество значений нижних оценок вершин. На начальной итерации $M^0 = \{A_1^0\}$. Q^k – множество значений верхних оценок вершин, на начальной итерации $Q^0 = \{A_1^0\}$. A_1^0 – начальная вершина графа ветвлений. H – количество вершин, для которых нужно вычислить нижние и верхние оценки. η_{i*}^k, μ_{i*}^k – верхняя и нижняя оценки вершины A_{i*}^k , соответственно. S^k – множество вершин подлежащих ветвлению на k -ой итерации. На начальной итерации

$S^0 = \{A_1^0\}$. p – допустимый номер тарелки питания из множества номеров $I_{r^*,j}^{k*}$, $r = \lfloor m/2 \rfloor$, $m = n_{r^*,j}^{k*}$, через $\lfloor a \rfloor$ обозначено целое число, меньшее чем a , ближайшее к нему; величина $n_{r^*,j}^{k*}$ – число номеров в множестве $I_{r^*,j}^{k*}$. Поиск завершается при выполнении условия невозможности дальнейшего дробления $r = 1$, т.е. для каждой колонны будет определена оптимальная тарелка питания, либо при выполнении условия $|\eta_{r^*}^{k*} - \mu_{r^*}^{k*}| < \varepsilon \cdot |\eta_{r^*}^{k*}|$.

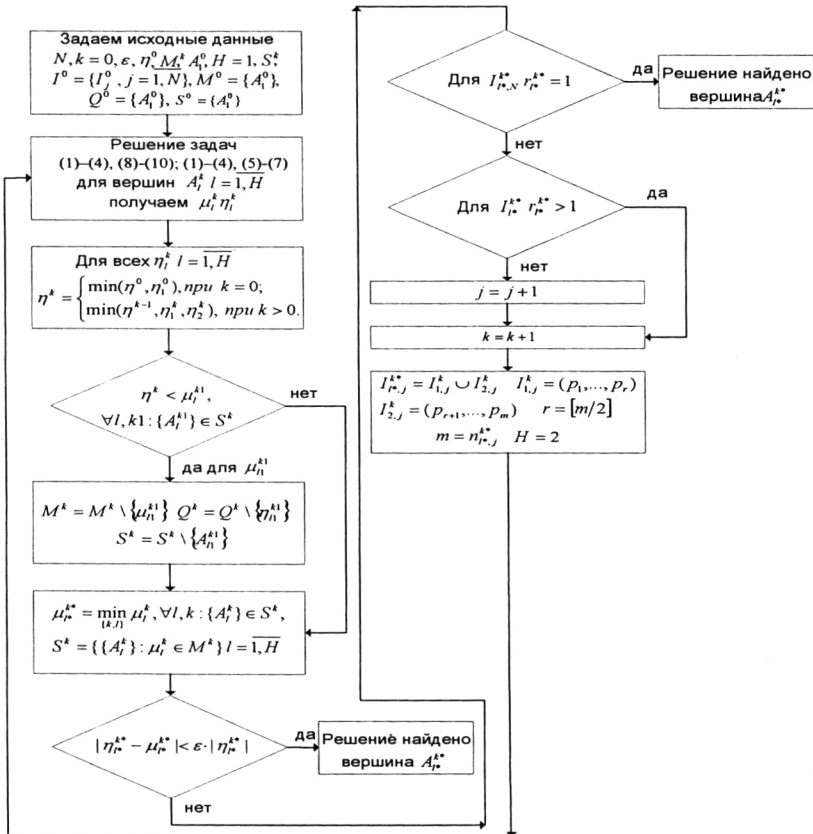


Рисунок 6 – Алгоритм решения задачи предложенным методом

Эффективность предложенного метода была проверена на примере оптимизации узла разделения газов пиролиза производства Этилен-200 ОАО «Казаньоргсинтез».

В пятой главе на основе предложенного метода решена задача дискретно-непрерывной оптимизации узла разделения изопренизоамиленовой фракции. В поставленной задаче управляющие параметры установки, оказывающие существенное влияние на критерий оптимальности (суммарные удельные энергозатраты) и качество разделения, были выбраны в качестве непрерывных, а номера тарелок питания колонн в качестве дискретных поисковых переменных. Задача поиска энергосберегающего режима работы установки была поставлена следующим образом: найти такие значения поисковых переменных, при которых критерий оптимальности примет минимальное значение, при выполнении ограничений на качество разделения ($x_{C5}^{K20} \leq 0,01$, $x_{C5}^{K35} \geq 0,86$), минимальные и максимальные значения поисковых переменных. Где x_{C5}^{K20} , x_{C5}^{K35} – содержания изопрена в дистиллятах колонн К-20, К35 соответственно.

Критерий оптимальности имеет следующий вид:

$$F = \{u_{\text{вода}} \cdot (G_{\text{вода}}^{T19} + G_{\text{вода}}^{T58} + G_{\text{вода}}^{K20} + G_{\text{вода}}^{K35}) + u_{\text{пар}} \cdot (G_{\text{пар}}^{K20a} + G_{\text{пар}}^{K35} + G_{\text{пар}}^{T35}) + u_{\text{гор.в}} \cdot (G_{\text{гор.в}}^{T71}) + u_{\text{э}} \cdot (G_{\text{изопрен}}^{60})\} / G_{\text{изопрен}}^{K35} \quad (11)$$

где $u_{\text{вода}}$ – цена промышленной воды, руб/м³; $u_{\text{пар}}$ – цена греющего пара, руб/Гкал; $u_{\text{гор.в}}$ – цена горячей воды, руб/м³; $u_{\text{э}}$ – цена электроэнергии, руб/кВтч; $G_{\text{вода}}^{T19}$, $G_{\text{вода}}^{T58}$, $G_{\text{вода}}^{K20}$, $G_{\text{вода}}^{K35}$ – расход воды, используемой для охлаждения в холодильнике Т-19, в конденсаторе Т-58, в дефлегматорах колонн К-20, К-35, соответственно, м³/час; $G_{\text{пар}}^{K20a}$, $G_{\text{пар}}^{K35}$ – количество тепла, затрачиваемого в кипятильниках колонн К-20а, К-35, соответственно; $G_{\text{гор.в}}^{T71}$ – расход горячей воды в теплообменник Т-71 для нагрева потока рецикла из К-35 в К-20а, Гкал/час; $G_{\text{изопрен}}^{60}$ – расход потока изопрена-рецикла, подаваемого в колонну К-20а, кг/час.

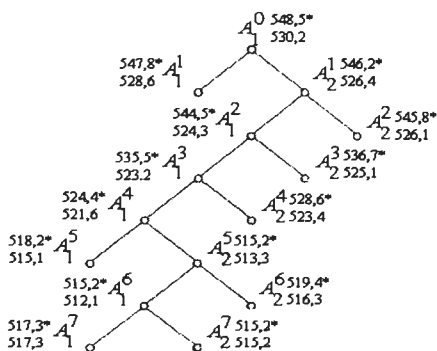


Рисунок 7 – Граф ветвления задачи

Ход решения задачи представлен на рис. 7. На графе рисунка 7, знак «*», означает верхнюю оценку критерия оптимальности соответствующей вершины, числа без обозначения – нижние оценки. Значения технологических параметров в рабочем и оптимальном режимах, представлены в таблице 1. Из приведенных результатов следует, что полученный оптимальный режим позволяет сэкономить суммарные удельные энергозатраты на 8,7%, а суммарный расход энергии на 13% при выполнении наложенных ограничений. Отметим, что найденный оптимальный режим был получен за 28 решений задачи оптимизации по непрерывным переменным, при этом простой перебор потребовал бы 128 расчетов оптимизационной процедуры.

Таблица 1 – Значения параметров установки в рабочем и оптимальном режимах

| Наименование поисковой переменной | Размерность | Рабочий режим | Оптимальный режим |
|---|-------------|---------------------------|-------------------|
| Температура катализата 1 в К-20 | °С | 45 | 90 |
| Температура катализата 2 в К-20а | °С | 54 | 90 |
| Температура ДМФА в К-20 | °С | 49 | 55 |
| Температура куба К-20а | °С | 101 | 99,8 |
| Расход бокового отбора К-35 (рецикла) | кг/ч | 22000 | 20000 |
| Расход флегмы в К-20 | кг/ч | 61000 | 61000 |
| Расход флегмы в К-35 | кг/ч | 30000 | 31000 |
| Расход ДМФА в К-20 | кг/ч | 216000 | 230000 |
| № тарелки подачи ДМФА | | 18 | 18 |
| № тарелки подачи катализата 2 в К-20а | | 38 | 18 |
| № тарелки питания колонны К-35 | | 34 | 25 |
| № тарелки ввода рецикла из К-35 в К-20а | | 68 | 76 |
| Наименование выходной переменной | | Результаты расчета | |
| Расход дистиллята К-20 | кг/ч | 22630 | 21744 |
| Содерж. изопрена в дистилляте К-20 | масс. д. | 0,027 | 0,009 |
| Производительность по изопрену сырцу | кг/ч | 13927 | 14813 |
| Содерж. изопрена в сырье | масс. д. | 0,86 | 0,86 |
| Удельные энергозатраты | усл. руб/т | 564,9 | 515,2 |
| Суммарный расход энергии | гкал/час | 38,8 | 33,7 |

На основе разработанного алгоритма получены оптимальные статические характеристики исследуемой установки, позволяющие

прогнозировать оптимальное введение процесса при изменении поступающих на разделение составов катализаторов первой и второй стадий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен системный анализ установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции. На построенной модели ХТС исследовано влияние режимных переменных и тарелок ввода питания и рециклов на суммарные удельные энергозатраты, производительность установки и качество разделения.
2. Выявлена тарелка колонны К-20 с максимальным содержанием н-пентана в изоамиленовой фракции. Частичный отбор парового потока с данной тарелки позволит значительно уменьшить содержание н-пентана в дистилляте колонны К-20.
3. Поставлена и формализована задача оптимизации действующих систем ректификационных колонн, которая сформулирована как задача структурно-параметрического синтеза сложных систем, для решения которой было решено использовать метод ветвей и границ.
4. Разработан подход к определению нижней оценки критерия оптимальности метода ветвей и границ в задаче выбора оптимальных тарелок питания системы ректификационных колонн.
5. На основе предложенного подхода разработан метод решения задачи выбора оптимальных тарелок питания и ввода рецикловых потоков колонн с одновременной оптимизацией установки по режимным переменным. Проверка работоспособности разработанного метода на примерах оптимизации промышленных установок разделения показала его высокую эффективность по критерию быстродействия.
6. С применением разработанного метода дискретно-непрерывной оптимизации сформулирована и решена задача оптимизации установки разделения изопрен-изоамиленовой фракции. Найдены оптимальные режим работы установки и номера тарелок ввода питания и рецикловых потоков в колонны, обеспечивающие снижение суммарных энергетических затрат на 8,7% (5,1 Гкал/ч).
7. Получены оптимальные статические характеристики исследуемой установки, позволяющие прогнозировать оптимальное ведение процесса при изменении поступающих на разделение составов катализаторов первой и второй стадий дегидрирования.

**Основные положения и результаты диссертационной работы
изложены в следующих публикациях**

Публикации в ведущих научных рецензируемых журналах,
рекомендованных ВАК:

1. Островский Г.М. Выбор оптимальных тарелок питания в замкнутой системе ректификационных колонн / Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Д.А. Рыжов // ТОХТ. – 2008. – Т. 42. – № 4. – С. 401 – 412.
2. Зиятдинов Н.Н. Поиск энергосберегающих режимов работы установки разделения изоамилен-изопреновой фракции производства изопрена / Н.Н. Зиятдинов, Д.А. Рыжов, Т.В. Лаптева, В.А. Курбатов // Вестник Казанского технол-го ун-та – 2009. – № 6. – С. 249 – 258.
3. Зиятдинов Н.Н. Поиск и исследование оптимальных режимов работы установки разделения изоамилен-изопреновой фракции производства изопрена / Н.Н. Зиятдинов, Д.А. Рыжов, В.А. Курбатов // Вестник Казанского технол-го ун-та – 2010. – № 7. – С. 315 – 321.

Публикации в сборниках трудов конференций:

1. Островский Г.М. Выбор оптимальных тарелок питания в системе ректификационных колонн / Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Д.А. Рыжов // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов 19-й Международ. науч. конф. – Воронеж, 2006. – Т. 2. – С. 22–24.
2. Зиятдинов Н.Н. Дискретно-непрерывная оптимизация замкнутой системы газоразделения / Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Д.А. Рыжов, Г.М. Островский // Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности. Сб. трудов 2-й Международ. науч. конф. – Саратов, 2007. – Т.2 – С. 47-51.
3. Рыжов Д.А. Модификация метода ветвей и границ для решения задачи дискретно-непрерывной оптимизации замкнутой химико-технологической системы / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский // Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования. Сб. трудов 2-й Международ. науч. конф. – Воронеж, 2007. – С. 170–171.
4. Рыжов Д.А. Компьютерное моделирование замкнутой химико-технологической системы для решения задачи дискретно-непрерывной оптимизации / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский // Компьютерное моделирование в химической технологии. Сб. трудов 3-й Международ. науч. конф. – Черкасск, 2008. – С. 87-88.

5. Богула Н.Ю. Метод UNSIDE-OUT для расчета однократного испарения / Н.Ю. Богула, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский, Д.А. Рыжов // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов 21-й Международ. науч. конф. – Саратов, 2008. – Т. 5. – С. 187–188.
6. Рыжов Д.А. Оптимизация установки газоразделения продуктов пиролиза / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология. Сб. трудов 2-й Всероссийской. студенческой науч. конф. – Казань, 2008. –С. 273–275.
7. Рыжов Д.А. Оптимизация режимов работы установки разделения изоамил-изопреновой фракции производства изопрена / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, В.А. Курбатов // Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений. 4-е кирпичниковские чтения. Сб. трудов 12-й Международ. науч. конф. – Казань, 2008. – С. 12 – 13.
8. Рыжов Д.А. Исследование статических характеристик и поиск энергосберегающих режимов работы узла разделения изоамил-изопреновой фракции производства изопрена / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, В.А. Курбатов, О.А. Мазурин // Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности. Сб. трудов 3-й Международ. науч. конф. – Казань, 2008. – С. 329–330.
9. Рыжов Д.А. Исследование статических характеристик узла разделения изоамил-изопреновой фракции производства изопрена / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, С.В. Антонов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Киев, 2010. – №2 – С. 46 – 49.
10. Рыжов Д.А. Выбор оптимальных тарелок питания системы ректификационных колонн при множестве потоков поступающих на разделение / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов 21-й Международ. науч. конф. – Саратов, 2008. – Т. 2. – С. 90–92.
11. Зиятдинов Н.Н. Исследование возможностей повышения эффективности производства изопрена / Н.Н. Зиятдинов, Д.А. Рыжов, Т.В. Лаптева, В.А. Курбатов // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов 23-й Международ. науч. конф. – Саратов, 2010. – Т. 11. – С. 22–24.

- 10 2
12. Рыжов Д.А. Моделирующие программы в оптимизации стационарных режимов технологических процессов / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, В.А. Курбатов // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов 19-й Международ. науч. конф. – Воронеж, 2006. – Т. 10. – С. 227–228.
 13. Антонов С.В. Дискретно-непрерывная оптимизация колонны разделения пропан-пропиленовой фракции / С.В. Антонов, Д.А. Зотеева, Д.А. Рыжов // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология. Сб. трудов 2-й Всероссийской студенческой науч. конф. – Казань, 2008. – С. 275–276.
 14. Зотеева Д.А. Сравнительный анализ методов оптимизации установки ректификации / Д.А. Зотеева, С.В. Антонов, Д.А. Рыжов // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология. Сб. трудов 2-й Всероссийской студенческой науч. конф. – Казань, 2008. – С. 275–276.
 15. Рыжов Д.А. Исследование статических характеристик установки разделения изоамил-изопреновой фракции производства изопрена / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, О.А. Мазурин // Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений. 4-е кирпичниковские чтения. Сб. трудов 12-й Международ. науч. конф. – Казань, 2008. – С. 13 – 14.
 16. Рыжов Д.А. Моделирование и оптимизация режимов работы узла разделения изоамил-изопреновой фракции производства изопрена / Д.А. Рыжов, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, В.А. Курбатов, Н.Ю. Богула // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов 22-й Международ. науч. конф. – Псков, 2009. – Т. 10. – С. 79–81.

Заказ 87

Тираж 100 экз.

420015, г. Казань, ул. К. Маркса д.68

Офсетная лаборатория Казанского государственного
технологического университета